

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Jukić

Zagreb, 2009

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

MEHANIČKE KARAKTERISTIKE GUMENIH CIJEVI ZA PRETOVAR CEMENTNOG KLINKERA

Voditelj rada:

Dr.sc. Janoš Kodvanj

Student

Ivan Jukić

Zagreb, 2009

Sadržaj

Popis oznaka.....	I
Popis slika	II
Popis tablica	III
1. Uvod.....	1
2. Vrste i svojstva guma	2
2.1 Svojstva	2
2.2. Sintetske gume	3
3. Statički vlačni pokus	4
3.1. Osnovne karakteristične veličine.....	4
3.2. Norma ISO 527	7
3.2.1. Brzina ispitivanja.....	7
3.2.2. Količina ispitnih uzoraka.....	7
3.2.3. Označavanje i tipovi ispitnog tijela.....	7
3.2.4. Dimenzije uzoraka.....	8
4. Provedba eksperimenta.....	10
4.1. Konstrukcija noža za izrezivanje epruveti.....	10
4.2. Priprema epruveta	12
4.3. Vidljivi nedostaci gume 1	13
4.4. Videoekstenzometar ME46-NG	15
4.5. Probno mjerenje videoekstenzometrom ME46-NG	17
4.6. Rad sa kidalicom	18
4.7. Ispitivanja pri povišenoj i sniženoj temperaturi	18
4.8. Prihvat epruveta.....	18
5. Rezultati ispitivanja.....	21
5.1. Guma 1	21
5.2. Guma 2	23
5.3. Guma 3	24
5.4. Skupni dijagram rezultata pri sobnoj temperaturi	26
5.5. Skupni dijagram rezultata pri povišenoj temperaturi (+70°C).....	27
6. Zaključak	29
7. Popis literature.....	30

Izjavljujem da sam radio samostalno koristeći se stečenim znanjem, navedenom literaturom i opremom Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku.

Zahvaljujem mentoru dr.sc. Janošu Kodvanju, na uloženom trudu, podršci, usmjeravanju u radu te ugodnoj suradnji pri izradi završnog rada.

Također se zahvaljujem asistentu dr.sc. Anti Bakiću na praktičnim rješenjima pri izradi završnog rada bez kojih bi proces bio mukotrpan i dugotrajan; mojem ujaku i tvtci TG Art na pomoći pri izradi epruveta; i cijelom timu u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku na vrlo ugodnoj radnoj atmosferi.

U Zagrebu, srpanj 2009.

Popis oznaka

E	[GPa]	- modul elastičnosti
R_m	[N/mm ²], [MPa]	- vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	[N/mm ²], [MPa]	- konvencionalna granica tečenja
ε	[mm/mm], [%]	- deformacija, istezanje (relativno produljenje)
ΔL	[mm]	- produljenje
L_0	[mm]	- početna mjerna duljine epruvete
F_e	[N]	- sila tečenja (razvlačenja)
F_m	[N]	- maksimalna sila
F_k	[N]	- sila pri kojoj puca epruveta
L_u	[mm]	- konačna mjerna duljine epruvete
σ	[N/mm ²], [MPa]	- naprezanje
S_0	[mm ²]	- početna površina poprečnog presjeka epruvete
R_e	[N/mm ²], [MPa]	- granica razvlačenja
ε_M	[mm/mm], [%]	- neproporcionalna postotna deformacija pri najvećoj sili
ε_{Mt}	[mm/mm], [%]	- ukupna postotna deformacija pri najvećoj sili
ε_K	[mm/mm], [%]	- postotna deformacija nakon kidanja
ε_{Kt}	[mm/mm], [%]	- ukupna postotna deformacija nakon kidanja
ΔL_u	[mm]	- produljenje nakon kidanja
A	[%]	- istezljivost
T	[°C]	- temperatura

Popis slika

Slika 2.1. Struktura elastomera: u prirodnom a) i rastegnutom stanju b).....	2
Slika 3.1. Dijagram kidanja $F-\Delta L$	4
Slika 3.2. Ispitni uzorak.....	5
Slika 3.3. Dijagram naprezanje – istezanje $\sigma-\epsilon$	6
Slika 3.4. Karakteristične veličine epruveta.....	8
Slika 3.5. Konačne dimenzije epruvete.....	9
Slika 4.1. Izvedba rezača.....	10
Slika 4.2. Detalji rezača.....	11
Slika 4.3. Pripremljene epruvete.....	12
Slika 4.4. Struna u materijalu.....	13
Slika 4.5. Detalji strune u materijalu.....	14
Slika 4.6. Shematski prikaz komponenata sustava.....	15
Slika 4.7. Postavljeni videoekstenzometar.....	16
Slika 4.8. Usporedba mjerenja sa i bez videoekstenzometra.....	17
Slika 4.9. Epruveta uklinjena štipaljkama.....	19
Slika 4.10. Pre veliko istezanje epruveta pri sobnoj i povišenoj temperaturi.....	19
Slika 4.11. Epruvete nakon ispitivanja.....	20
Slika 5.1. Guma 1 skupni dijagram.....	21
Slika 5.2. Guma 2 skupni dijagram.....	23
Slika 5.3. Guma 3 skupni dijagram.....	24
Slika 5.4. Skupni dijagram rezultata pri sobnoj temperaturi.....	26
Slika 5.5. Skupni dijagram rezultata pri povišenoj temperaturi (+70°C).....	27
Slika 5.6. Skupni dijagram rezultata pri sniženoj temperaturi (-30°C).....	28

Popis tablica

Tablica 3.1. Brzine ispitivanja polimernih materijala.....	7
Tablica 3.2. Dimenzije epruveta prema normi.....	8
Tablica 5.1. Rezultati ispitivanja za gumu 1 pri sobnoj temperaturi.....	22
Tablica 5.2. Rezultati ispitivanja za gumu 1 pri povišenoj temperaturi (+70°C).....	22
Tablica 5.3. Rezultati ispitivanja za gumu 1 pri sniženoj temperaturi (-30°C).....	22
Tablica 5.4. Rezultati ispitivanja za gumu 2 pri sobnoj temperaturi.....	23
Tablica 5.5. Rezultati ispitivanja za gumu 2 pri povišenoj temperaturi (+70°C).....	23
Tablica 5.6. Rezultati ispitivanja za gumu 2 pri sniženoj temperaturi (-30°C).....	24
Tablica 5.7. Rezultati ispitivanja za gumu 3 pri sobnoj temperaturi.....	25
Tablica 5.8. Rezultati ispitivanja za gumu 3 pri povišenoj temperaturi (+70°C).....	25
Tablica 5.9. Rezultati ispitivanja za gumu 3 pri sniženoj temperaturi (-30°C).....	25

1. Uvod

Mehaničke karakteristike materijala koji predstavljaju osnovu za proračun čvrstoće konstrukcijskih elemenata određuju se eksperimentalno. Provode se pokusi rastezanja, savijanja i smicanja. Svojstva materijala kao što su modul elastičnosti E , vlačna čvrstoća R_m , konvencionalna granica tečenja $R_{p0,2}$ i istezanje A određuju se statičkim vlačnim pokusom na epruvetama s kružnim ili pravokutnim poprečnim presjekom.

Guma kao konstrukcijski materijal danas nalazi široku primjenu u automobilskoj industriji, a osim toga koristi se za izradu cijevi i kao izolacijski materijal.

U ovom radu ispitana su mehanička svojstva tri vrste guma koje se koriste za izradu cijevi sustava za pretovar cementnog klinkera u brodove. Kako se cementni klinker prenosi i u zagrijanom stanju kao i pri niskim vanjskim temperaturama ispitivanja za sve tri vrste gume provedena su na sobnoj temperaturi, te na temperaturama -30°C i $+70^{\circ}\text{C}$.

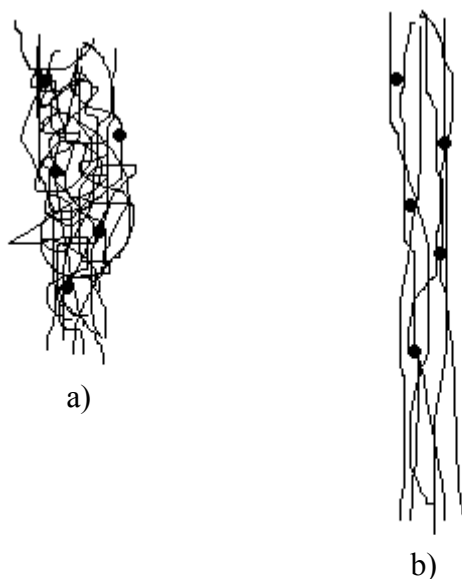
U uvodnom dijelu rada definirane su karakteristične veličine kod statičkog vlačnog pokusa i navedeni su osnovni zahtjevi norme prema kojoj su provedena ispitivanja. U četvrtom poglavlju opisana je provedba eksperimenata i način bezkontaktnog mjerenja defracija tijekom ispitivanja pomoću videoekstenzometra. Također su opisane poteškoće koje su se pojavile tijekom ispitivanja epruveta na kidalici pri različitim temperaturama, kao i neka saznanja pri izradi epruveta. Rezultati ispitivanja prikazani u su petom poglavlju, dok se zaključci izvedeni na temelju provedenih ispitivanja nalaze u petom poglavlju.

2. Vrste i svojstva guma

Gume koje su ispitane u okviru ovog rada su sintetskog porijekla, a takve gume spadaju u grupu polimera koji se nazivaju elastomeri.

2.1 Svojstva

Svi gumasti materijali su u biti polimeri, a polimeri su velike molekule sastavljene od dijelova koji se ponavljaju (monomera) povezanih u dugačke lance. Skrućivanjem iz stanja taljevine stvaraju se kemijske veze između labavo namotanih polimernih lanaca.



Slika 2.1. Struktura elastomera: u prirodnom a) i rastegnutom stanju b)

Elastičnost guma proizlazi iz toga što se ti labavi lanci mogu istegnuti (Slika 2.1). Prirodna struktura je u stanju entropije (nereda) i takva želi ostati, kada se guma navlači struktura se isteže i postaje pravilnija, ali se uvijek želi vratiti u početno prirodno stanje entropije tj. uneređene strukture.

Nevulkanizirana guma, tj. ne stvrdnjena guma (zagrijana pa ohlađena) se može otopiti u brojnim ugljikovodikovim spojevima poput benzena, benzina i uljima za podmazivanje. Odbija vodu i otporna je na lužine i slabije kiseline. Svojstva poput elastičnosti, izdržljivosti, neprobojnosti, te prionjivosti i električna otpornost gumi daju mnoge uporabe poput: ljepila, presvlaka, vlakna, električnih izolatora itd.

Općenito, sintetska guma ima slijedeće prednosti nad organskom: bolja otpornost na starenje, atmosferske uvjete, ulja, razrjeđivače, kisik, ozon i određene kemikalije te bolju gipkost u širokom rasponu temperatura. Prednost prirodne gume je što se u njoj tokom savijanja akumulira manje topline i ima veću otpornost na kidanje pri povišenoj temperaturi.

2.2. Sintetske gume

Više od desetak grupa sintetskih guma potječu od sirovog materijala deriviranog iz petroleja, ugljena, nafte, prirodnog plina i acetilena. Veliki broj njih su kopolimeri, tj. polimeri sastavljeni od većeg broja monomera. Mijenjajući sastav moguće je postići specifična svojstva koja su potrebna za željenu uporabu.

Najranija sintetska guma je bila napravljena od butadien-stiren kopolimera, tzv. Buna-S čija su svojstva najbliža prirodnoj gumi. Danas je najčešće korišteni elastomer zbog svoje niske cijene i dobrih svojstava, uglavnom se koristi za automobilske pneumatike.

Među posebnim elastomerima su kopolimeri butadiena i akrilnitrata koji su se zvali Buna N ali su danas poznati pod imenom nitril elastomeri. Imaju odličnu otpornost na maziva i široku uporabu nalaze u savitljivim spojevima, cijevima i dijelovima za perilice rublja. Butil gume su kopolimeri izobutilena i 1.3% izoprena. Vrijedni su zbog dobre otpornosti na abraziju, niske propusnosti plinova i visoke dielektrične otpornosti. Neopren (polikloropren) je posebno korisan kod povišenih temperatura i koristi se za rad u teškim uvjetima. Etilen-propilen gume se sa svojom visokom otpornošću na atmosferske uvjete i sunce koriste za automobilske dijelove, cijevi, električnu izolaciju i obuću. Uretanski elastomeri se zovu i Spandex i sastoje se od uretanskih i poliesterskih blokova, uretanski blokovi pružaju čvrstoću i toplinsku otpornost, a poliestar pruža elastičnost; oni su najraširenija obitelj elastomera te su višestruko upotrebljivi zbog svoje tvrdoće, čvrstoće, otpornosti na maziva i starenje. Zamijenili su gumu u elastičnim materijalima. Druge svrhe kreću od avionskih kotača do jastuka u sjedalima. Ostale sintetske gume imaju visoku otpornost na maziva ali njihova cijena ograničava uporabu. Silikonske gume su organski derivati anorganskih polimera, npr. polimer od dimetisilannediola. Vrlo su stabilni i savitljivi u širokom temperaturnom rasponu, široko se koriste u izolaciji žica i kabela.

Iz poznavanja svojstava sintetskih guma općenito, a uzevši u obzir da je sastav ispitivanih guma nepoznat, može se pretpostaviti da se radi o nekoj vrsti neoprenskog polimera zbog povišenih temperatura i rada u teškim uvjetima.

3. Statički vlačni pokus

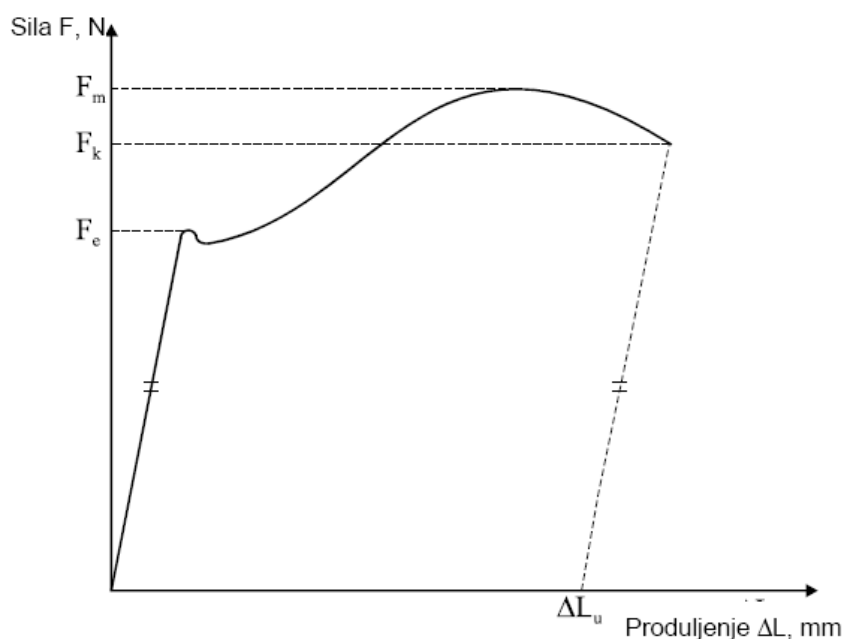
3.1. Osnovne karakteristične veličine

Statički vlačni pokus definiran je normom HRN EN 10002-1 i služi za određivanje mehaničkih svojstava kao što su modul elastičnosti E , vlačna čvrstoća R_m , konvencionalna granica tečenja $R_{p0,2}$, produljenje ε ; metalnih materijala pri statičkom opterećenju.

Epruvete koje su prethodno napravljene stavljaju se u čeljusti kidalice, te se opterećuju vlačnom silom.

Brzina deformiranja tijekom statičkog vlačnog pokusa u velikoj mjeri utječe na mehanička svojstva materijala, u prvom redu na modul elastičnosti, te je propisana standardom. Uobičajene brzine su ≤ 10 MPa u sekundi i za takvo sporo opterećivanje najprikladniji je hidraulički pogon kidalice, a pri takovom hidrauličkom sustavu moguće je u svakom trenu rasteretiti epruvetu. Iznos sile kojom je opterećena epruveta iskazan je na skali kidalice u N ili kN.

Budući da u svakom tijelu opterećenje odnosno proizvedeno naprezanje izaziva deformaciju, tako će se i pri statičkom vlačnom pokusu epruveta produljivati. Stoga se pri statičkom vlačnom ispitivanju pored vrijednosti sile prati i produljenje epruvete. Na zaslonu kidalice se za vrijeme statičkog vlačnog pokusa crta dijagram sila-produljenje, $F-\Delta L$, koji se naziva i dijagramom kidanja. Produljenje ΔL , u mm predstavlja povećanje razmaka L_0 koji je naznačen na epruveti prije ispitivanja a predstavlja početnu mjernu duljinu epruvete. Na slici 3.1. prikazan je dijagram kidanja $F-\Delta L$ za meki konstrukcijski čelik.

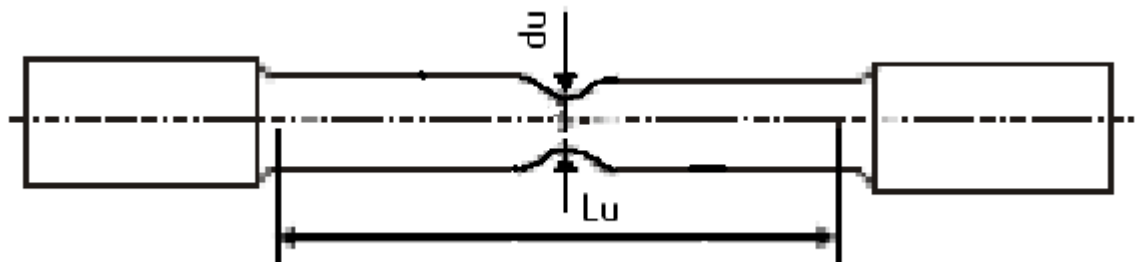


Slika 3.1. Dijagram kidanja $F-\Delta L$

U prvom dijelu dijagrama $F-\Delta L$ linearna je ovisnost sile i produljenja, što znači da istim prirastima sile odgovaraju i jednaka produljenja. Takva zakonitost vrijedi sve do vrijednosti

sile F_e koja se naziva silom tečenja (razvlačenja). Nakon dostizanja te sile ispitni uzorak se nastavlja produljivati uz čak i mali pad opterećenja. Za daljnji porast produljenja potreban je opet porast sile. Međutim u tom dijelu statičkog vlačnog ispitivanja više ne postoji linearna ovisnost između povećanja sile i produljenja. Opterećenje se povećava sve do dostizanja maksimalne sile F_m , nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz sve manju i manju silu. Konačno, pri vrijednosti sile F_k dolazi do loma (pucanja) epruvete.

Sastavi li se puknuti ispitni uzorak, te izmjeri razmak točaka koji je prije ispitivanja iznosio L_0 dobiti će se konačna mjerna duljina L_u (slika 3.2).



Slika 3.2. Ispitni uzorak

Produljenje nakon kidanja ΔL_u , tada iznosi: $\Delta L_u = L_u - L_0$, mm. Ta vrijednost naznačena je također na apscisi dijagrama $F-\Delta L$, a dobiva se, ako se iz konačne točke dijagrama povuče paralela s linearnim dijelom dijagrama i nađe presjecište tog pravca i osi apscisa (slika 3.1). Iznosi sile pri statičkom vlačnom ispitivanju ne daju uvid u ponašanje materijala ukoliko se u obzir ne uzme površina poprečnog presjeka epruvete. Stoga se uvodi pojam naprezanja, tj. sile po jedinici površine prema izrazu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (3.1)$$

gdje je

F –sila izražena u N

S_0 –površina početnog presjeka u mm^2 .

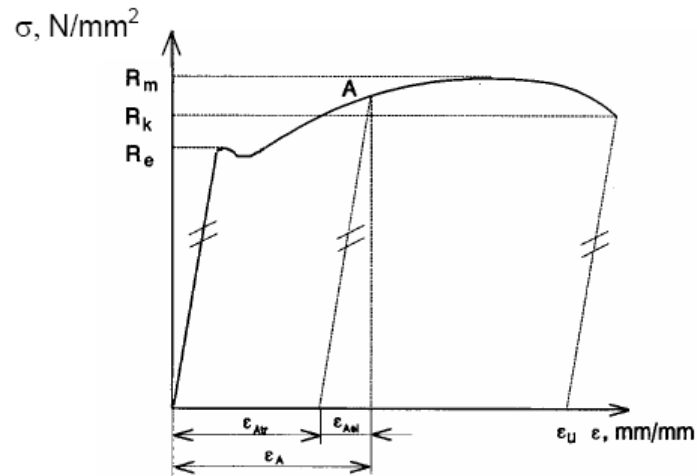
Prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \text{ mm/mm} \quad (3.2)$$

proizlazi pojam istezanja ili relativno produljenje (produljenje po početnom razmaku), a koji može biti izražen i u postocima

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100, \% \quad (3.3)$$

Na taj se način iz dijagrama sila – produljenje $F-\Delta L$ dobiva dijagram naprezanje – istezanje $\sigma-\varepsilon$ (slika 3.3.).



Slika 3.3. Dijagram naprezanje – istezanje σ - ϵ

Nadalje materijal nakon prijedene granice razvlačenja ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija. Ako se u točki A (slika 3.3) epruveta rastereti ($\sigma=0$) u njoj će ostati prisutna plastična ili trajna deformacija ϵ_{Atr} . To znači da će razmak mjernih točaka koji je prije označen sa L_0 biti uvećan za iznos ΔL_A pa je

$$\epsilon_{Atr} = \frac{\Delta L_A}{L_0}, \text{ mm/mm} \quad (3.4)$$

Naprezanje kod maksimalne sile naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom i jednako je:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2. \quad (3.5)$$

Naprezanje kod kojeg epruveta puca naziva se konačnim naprežanjem i definirano je izrazom

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N/mm}^2. \quad (3.6)$$

Vrijednost istezanja nakon kidanja određuje se prema izrazu :

$$\epsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \text{ mm/mm}, \quad (3.7)$$

a dobiva se u dijagramu σ - ϵ na isti način kao i vrijednost Δl_u , u dijagramu F - ΔL povlačenjem paralele iz konačne točke dijagrama s Hooke-ovim pravcem i nalaženjem presjecišta tog pravca s osi apscisa (slika 3.3.).

Ukoliko se vrijednost ϵ_u izrazi u postocima označava se slovom A i naziva istezljivost

$$A = \epsilon_u \cdot 100, \% \quad (3.8)$$

3.2. Norma ISO 527

Norma ISO 527 se po principu izvođenja oslanja na standardan statički vlačni pokus opisan u poglavlju 3, no propisuje dimenzije epruvete i brzinu ispitivanja (u mm/min). Svrha norme je standardizirati ispitivanje polimernih materijala.

3.2.1. Brzina ispitivanja

Tablica 3.1. Brzine ispitivanja polimernih materijala

brzina [mm/min]	tolerancija [%]
1	$\pm 20^{(1)}$
2	$\pm 20^{(1)}$
5	± 20
10	± 20
20	± 10
50	± 10
100	± 10
200	± 10
500	± 10

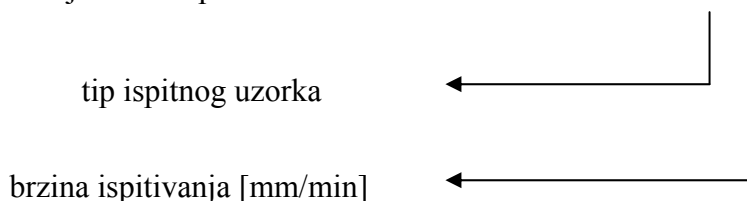
Brzina ispitivanja je dana tablicom, s obzirom da se radi o elastičnom materijalu odabrana je brzina od 50 mm/min kako bi se skratilo vrijeme provođenja ispitivanja.

3.2.2. Količina ispitnih uzoraka

Standardom je propisano korištenje minimalno 5 ispitnih uzoraka. Ispitivanja u okviru ovog rada su provedena za tri vrste gume na tri različite temperature (-30°C , sobna temperatura, $+70^{\circ}\text{C}$), odnosno ispitano je ukupno 45 epruveta.

3.2.3. Označavanje i tipovi ispitnog tijela

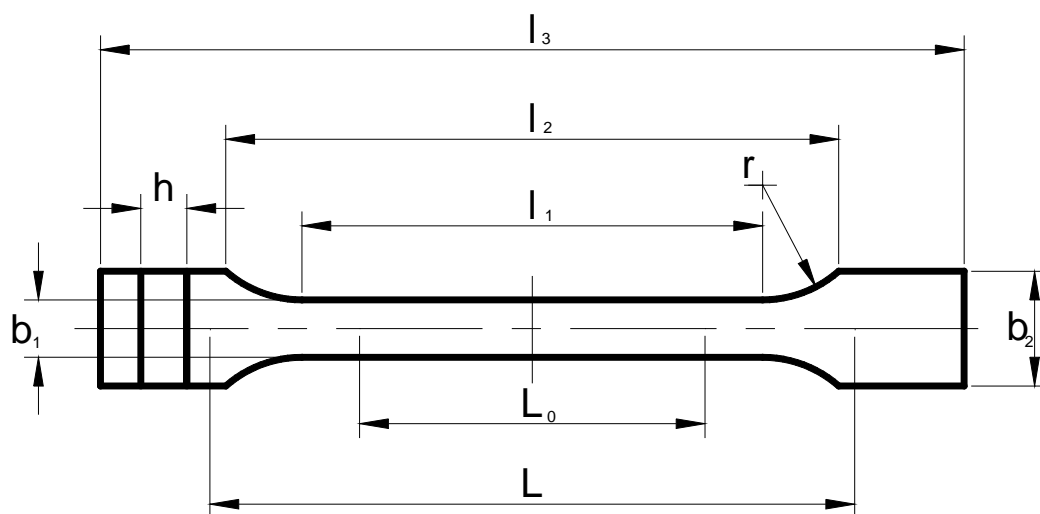
Za označavanje ispitnih uzoraka tijekom eksperimenta koristi se oznaka ISO/527-2/1B/50



Mogući tipovi ispitnog uzorka su 1A i 1B. 1A je za višenamjensko ispitivanje a 1B za strojne ispitne uzorke. Za ova ispitivanja odabran je tip 1B jer će epruvete biti strojno izrezane

3.2.4. Dimenzije uzoraka

Dimenzije epruveta prema preporuci norme prikazane su na slici 3.4 i tablici 4.2.



Slika 3.4. Karakteristične veličine epruveta

Tablica 2. Dimenzije epruveta prema normi

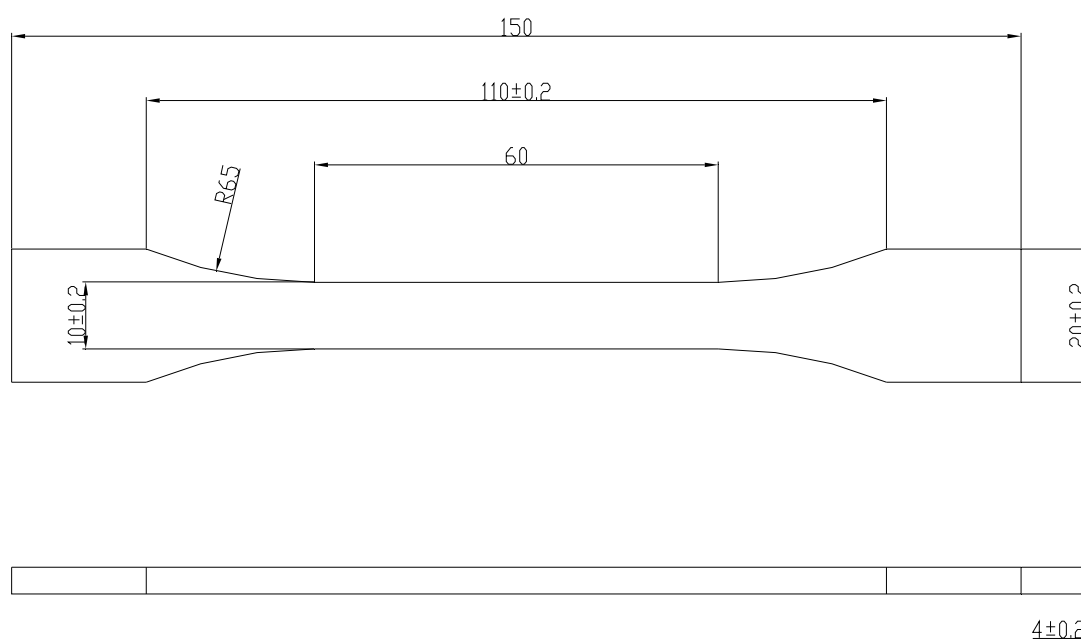
Tip ispitnog tijela	Dimenzije [mm]	
	1A	1B
l_3 – ukupna duljina	$\geq 150^{(1)}$	
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r – radijus	$20 \div 25$	$\geq 60^{(2)}$
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	$104 \div 113^{(3)}$	$106 \div 120^{(3)}$
b_2 – širina pri kraju	$20 \pm 0,2$	
b_1 – širina uskog dijela	$10 \pm 0,2$	
h – debljina	$4 \pm 0,2$	
L_0 – mjerna duljina	$50 \pm 0,5$	
L – početna udaljenost između ispitivanja	115 ± 1	l_{20}^{+5}

(1) Za neke materijale duljina se mora povećati (npr. $l_3 = 200$ mm) da se izbjegne lomljenje ili klizanje u čeljustima kidalice

(2) Polumjer radijusa zaobljenja određuje se prema izrazu

$$r = \frac{\left[(l_2 - l_1)^2 + (b_2 - b_1)^2 \right]}{4 \cdot (b_2 - b_1)} \quad (3.9)$$

(3) U zavisnosti o l_1 , r , b_1 i b_2 , ali u granicama tolerancije.



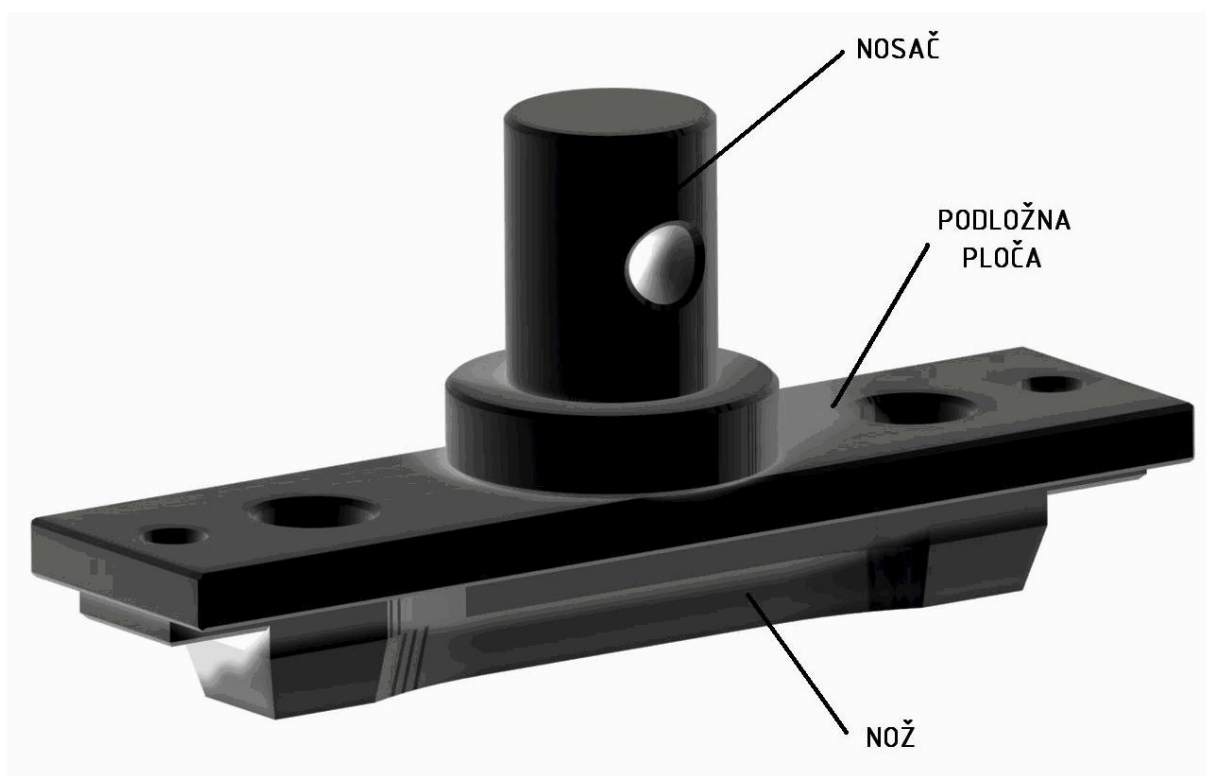
Slika 3.5. Konačne dimenzije epruvete

Prema izrazu za radijus zaobljenja (3.9) i iz dimenzija prema tablici 4.2 dobivene su konačne dimenzije epruvete koje su prikazane na slici 3.5. Radionički crtež se nalazi u prilogu.

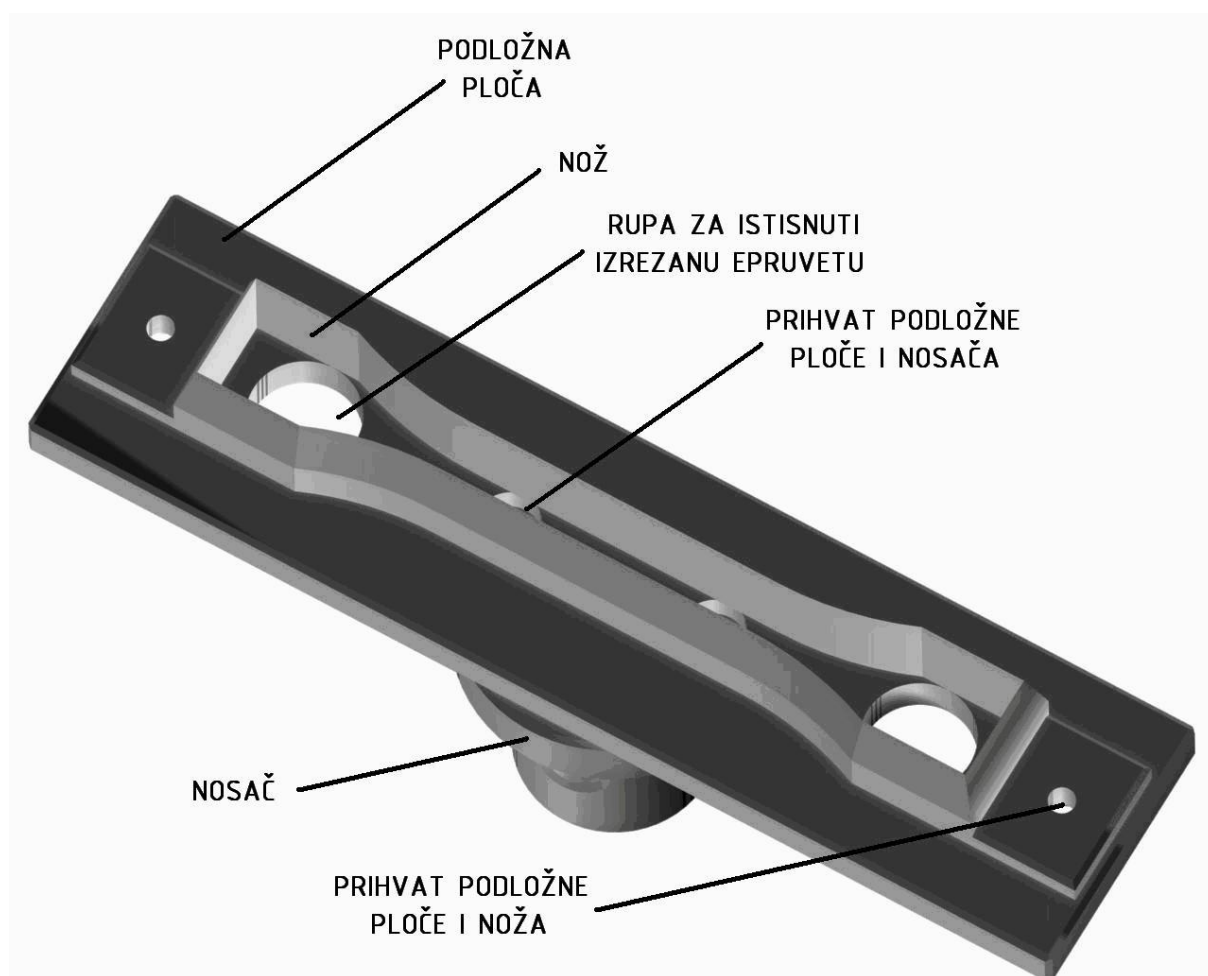
4. Provedba eksperimenta

4.1. Konstrukcija noža za izrezivanje epruveti

Kao konstrukcijski zadatak bilo je potrebno razraditi nož kojim bi se standardne epruvete iz prethodnog poglavlja mogle jednostavno izrezivati. Samo izrezivanje bi se izvodilo na statičkoj kidalici pomoću konstruiranog noža (slika 4.1) uz brzinu rezanja do 5mm/min. Nož za izrezivanje sastoji se od nosača koji osigurava veza s kidalicom pomoću provrta i zatika i podložne ploče na koji je pričvršćenja oštrica koja ima oblik ispitne epruvete. Ovakav način izrezivanja osigurava glatke rubove uzoraka bez zareza što je posebno važno na paralelnoj mjernoj duljini epruvete l_1 (vidi sliku 3.4). Detalji rezača prikazani su na slici 4.2. Ovakvom izrezivanju prethodilo je rezanje guma na pločice duljine 4mm kao što propisuje norma. Radionički crtež noža nalazi se u privitku.



Slika 4.1. Izvedba rezača



Slika 4.2. Detalji rezača

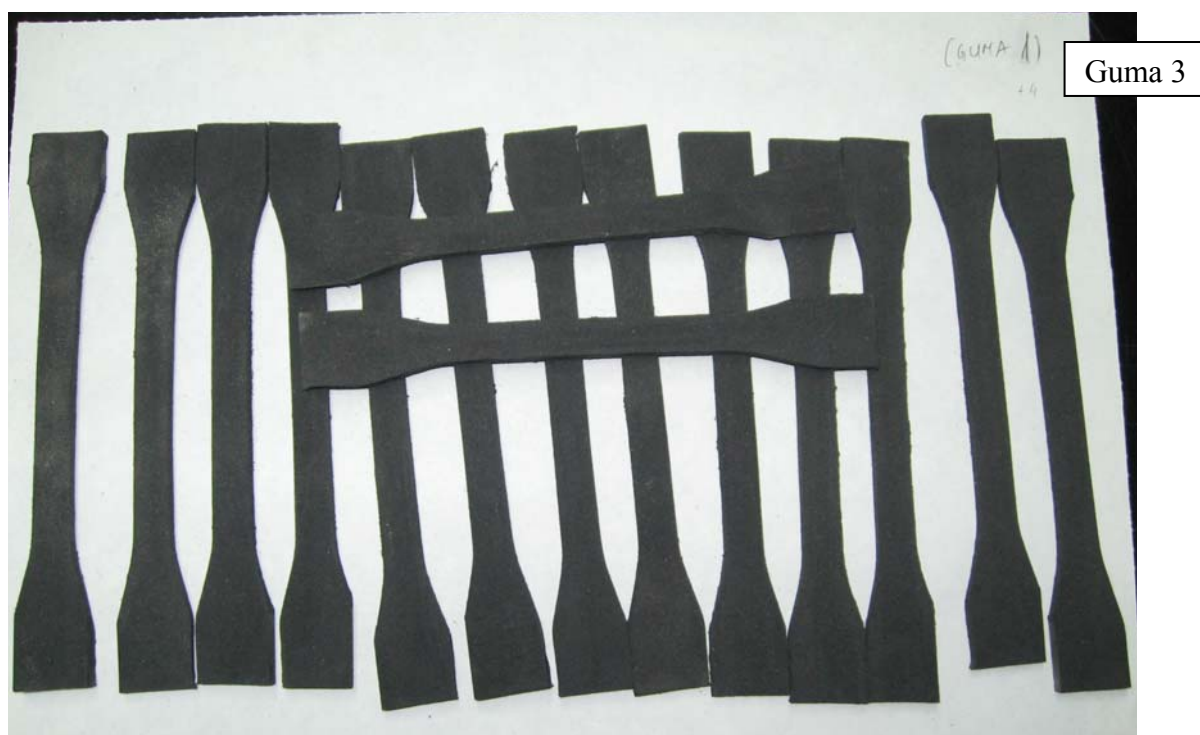
4.2. Priprema epruveta

Epruvete su napravljene iz tri gume koje su označene sa: guma 1, guma 2 i guma 3 (u daljnjem tekstu G1, G2, G3). G1 uzorak gume dobiven je iz pogona i ona je svojim otkazivanjem izazvala zastoje u radu. G2 i G3 su probne gumeza koje je trebalo utvrditi da li su njihova svojstva za uporabu kod pretovara cementnog klinkera povoljnija od postojeće gume IP.

Uzorci guma su bili u dimenzijama otprilike 250x200x20mm (DxŠxV). Sam proces pripreme epruveta se sveo na dva bitna dijela, prvi je rezanje u pločice debljine 4mm i dužine 150mm a nakon toga izrezivanje nožem u obliku epruvete za dobivanje konačnog oblika.

Gume su dijelom rezane tračnom pilom no zbog problema s uklinjanjem zbog velike elastičnosti gume, drugi dio je rezan na posebnom aparatu za rezanje guma na principu cirkularne pile koja radi na komprimirani zrak. Nakon što su se dobile pločice koje gabaritno odgovaraju normi, slijedilo je izrezivanje na ručnoj preši. U glavu štanice se umetnuo nož koji reže epruvete na konačne dimenzije koje odgovaraju normi ISO 527. Već izrezane pločice su se umetnule ispod noža, a zatim se kolo ručno zakrenulo, pri čemu je nož odrezao višak materijala, na taj način su dobivene epruvete oblika prema slici 4.3.

Zbog specifičnih svojstava gume kao materijala, izrada epruveta bila je otežana te zbog toga postoje velika odstupanja u dimenzijama koja su utjecala i na rezultate što je vidljivo i objašnjeno u poglavlju 5.



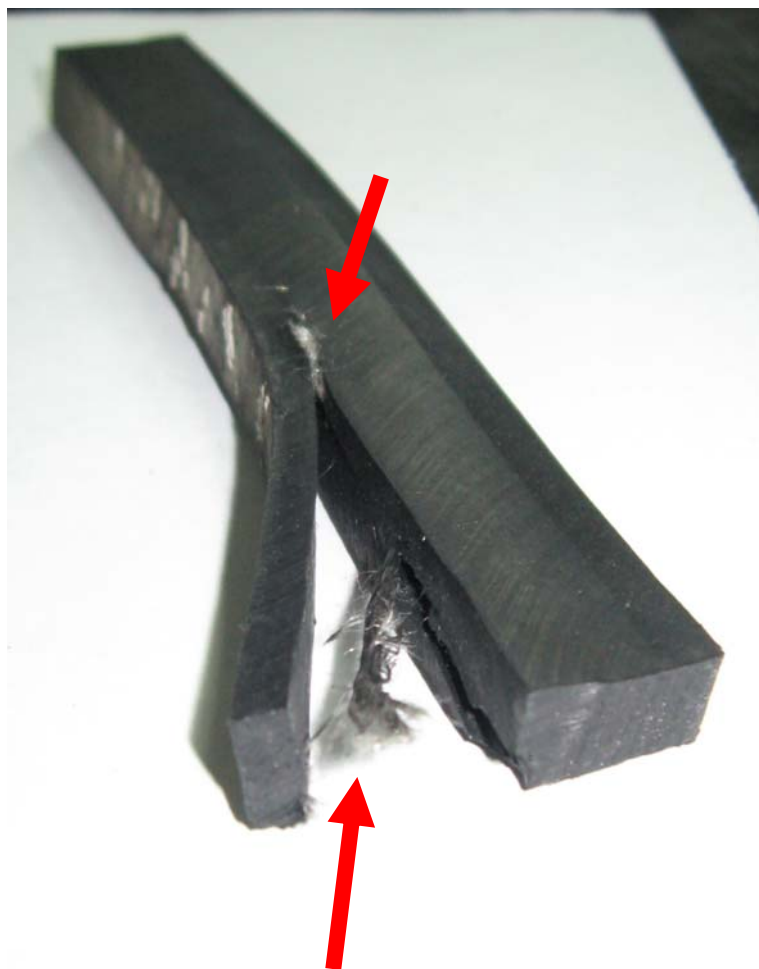
Slika 4.3. Pripremljene epruvete

4.3. Vidljivi nedostaci gume 1

Guma 1 izrađena je iz tri sloja, vanjski, srednji i unutarnji. No prilikom izrade, tj. rezanja u pločice uočeno je da se između unutarnjeg i srednjeg sloja gume nalazi komad strune. Pozicija strune je pod kutem u odnosu na probni uzorak, nema naznaka o drugim strunama i promjer strune je relativno velik (3mm) što ukazuje na činjenicu da se ne radi o ojačalu gume već o pogrešci u proizvodnji gume. Struna u takvoj gumi djeluje zarezno i predstavlja slabo mjesto. Same epruvete izrezane iz gume 1 ne sadrže strunu tako da ona neće utjecati na rezultate.



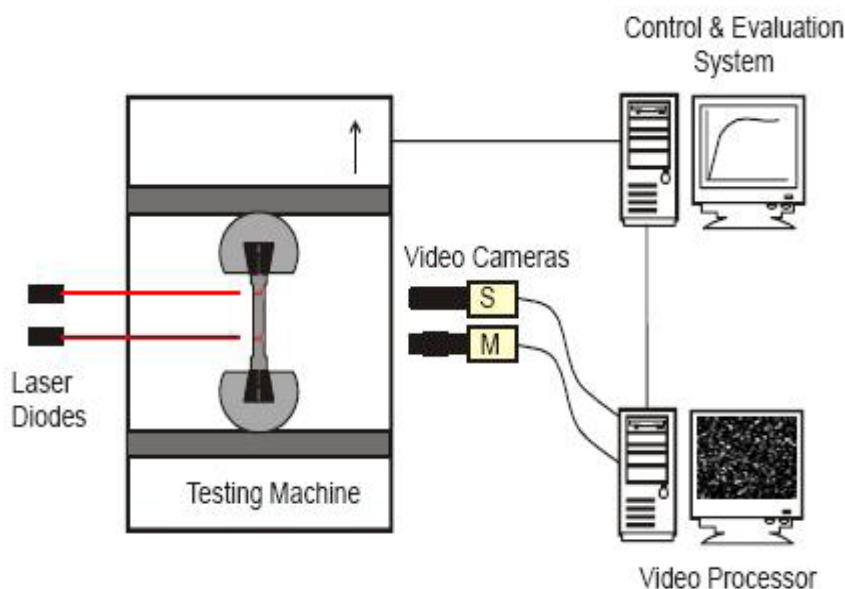
Slika 4.4. Struna u materijalu



Slika 4.5. Detalji strune u materijalu

4.4. Videoekstenzometar ME46-NG

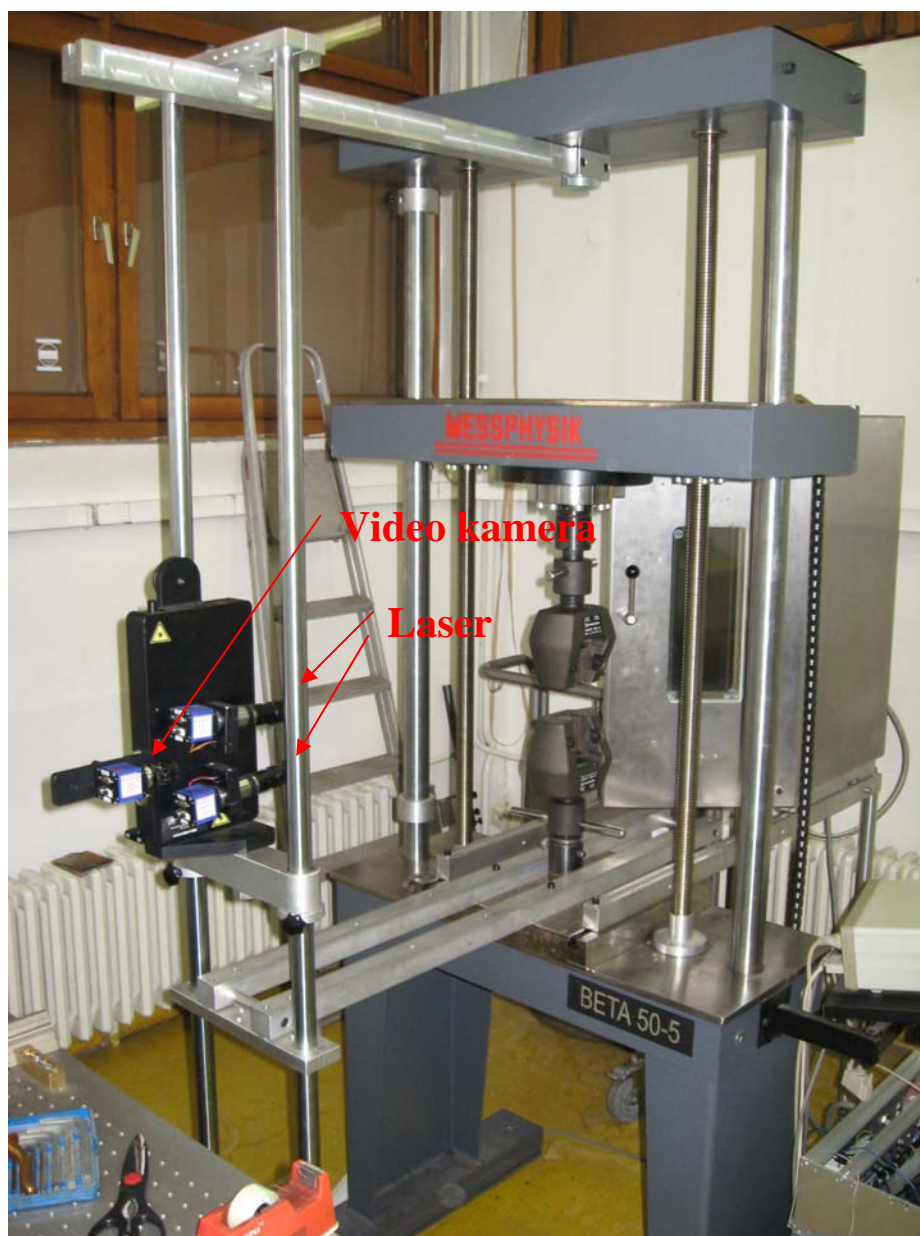
Za mjerenje deformacije korišten je videoekstenzometar „Messphysik ME46-NG“, koji je kompatibilan s kidalicom. Shematski prikaz spajanja komponenata dan je na slici 4.6. Videoekstenzometar se sastoji od jedne video kamere, dva lasera i postolja za usmjeravanje kamera u određeni položaj (slika 4.7). Laser je snage 3mW i valne duljine 660nm (crvena). Za provedbu mjerenja potrebna su 2 računala koja su povezana LAN komunikacijom, jedno za upravljanje s kidalicom, i drugo koje preko programa upravlja s videoekstenzometrom.



Slika 4.6. Shematski prikaz komponenata sustava

Ova optička metoda mjerenja deformacije ima velike prednosti u odnosu na klasične mehaničke ekstenzometre. Kod optičkog mjerenja nema zareznog djelovanja na materijal epruvete, mjerenje je bezkontaktno. Ako je potrebno mjeriti karakteristike materijala u uvjetima povišene temperature ili agresivne okoline, mjerenje se može provesti kroz stakleni otvor komore za temperiranje unutar koje se vrši ispitivanje.

Videoekstenzometar ima dva načina rada, jedan sa dva lasera a drugi sa video kamerom (slika 4.7). U ovom radu koristili smo način sa video kamerom. Na epruvetu se zalijepe dva papirnata markera koje video kamera koristi kao referencu za određivanje izduženja. Marker su kontrast crne i bijele boje. Kod takvog načina rada dolazilo je do poteškoća sa prionjivošću markera o epruvetu. Kod velikog izduženja epruvete površina na koju je zalijepljen marker se jako deformira te marker ili otpadne ili očitavanja postanu ne precizna. Problem sa otpadanjem markera se djelomično rješio tako što se epruveta fizički, preko šablone, presprejala bijelom bojom, kao konačan rezultat dobile su se oštre bijele linije. Tako se opet dobio efekt kontrasta kakav pružaju markeri (epruveta je crna, a linije bijele) na kojima video kamera bilježi pomake. Sada markeri više nisu mogli otpasti, ali se kod velikog izduženja boja na epruveti također jako izdužila te se oštra bijela linija rasipala i mjerenja su ponovno bila neprecizna (veliki skokovi u dijagramu). Zbog navedenih poteškoća kao i razloga navedenih u slijedećem poglavlju 4.5 odlučeno je mjerenje pomaka tj. izduženja pratiti mehanički preko kidalice.

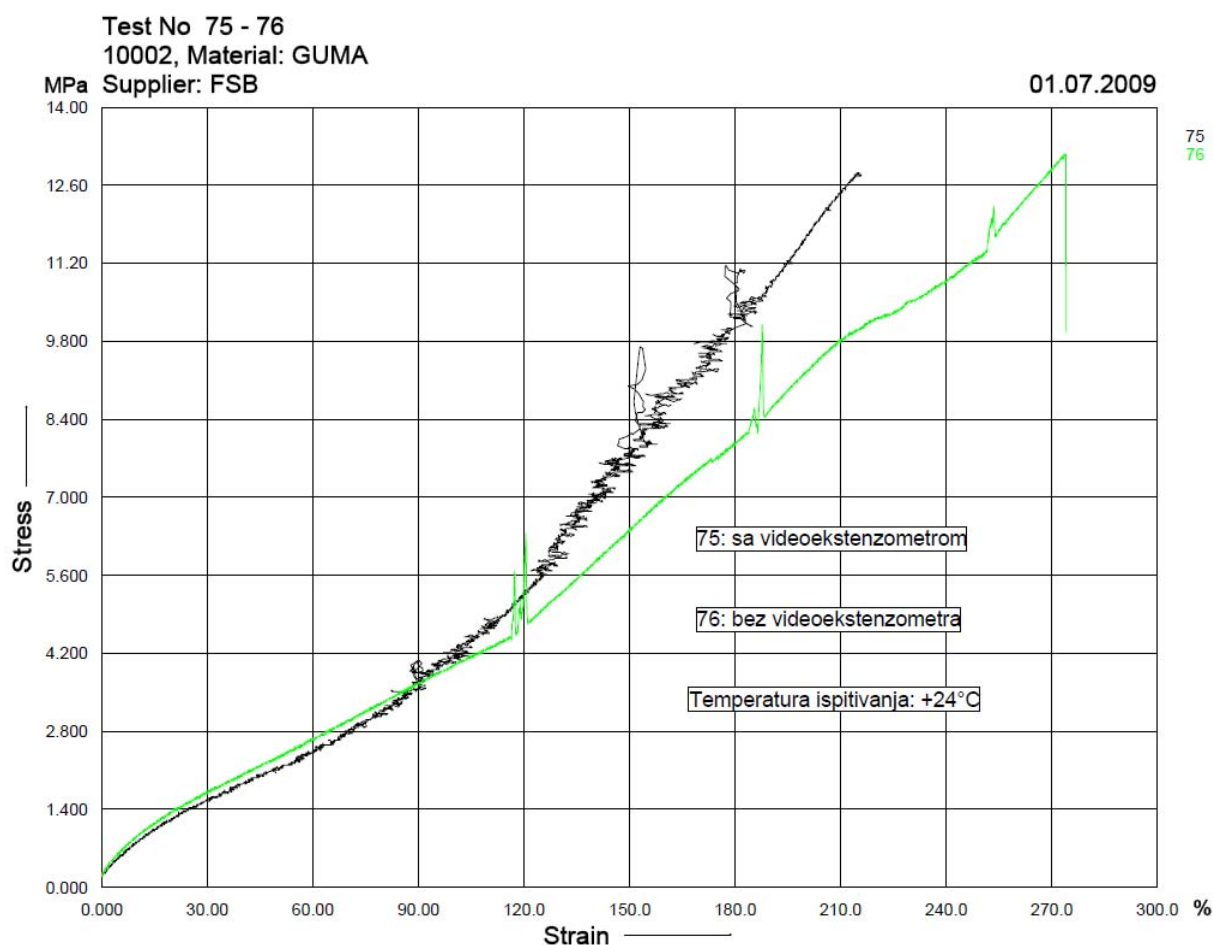


Slika 4.7. Postavljeni videoekstenzometar

4.5. Probno mjerenje videoekstenzometrom ME46-NG

Videoekstenzometar se koristi radi preciznijeg određivanja produljenja epruvete. Kidalice određuje deformacije ali kod velikih sila (nekoliko desetaka kN kod metala) dolazi do izražaja elastičnost same kidalice, krutost same konstrukcije, zračnost spojeva tako da je određivanje istezanja vrlo neprecizno. Kako se u ovom radu ispituje guma kojoj je prekidna čvrstoća R_m za nekoliko reda veličine manja od metala (do 11 MPa), deformacije same kidalice i utjecaj zračnosti pojedinih spojeva mogu se zanemariti i nemaju znatniji utjecaj na određivanje modula elastičnosti

S ciljem provjere gore navedene pretpostavke obavljeno je probno mjerenje sa i bez s epruvetom iz gume 2 na sobnoj temperaturi.



Slika 4.8. Usporedba mjerenja sa i bez videoekstenzometra

Iz slike se vidi da je razlika u području modula elastičnosti zanemarivo mala. Za prekidnu čvrstoću točnost izduženja nije bitna. Na dijagramima se vide skokovi, tu je epruveta ručno pritezana radi puzanja. Graf ispitivanja sa videoekstenzometrom je grub jer se boja kojom su označene linije koje služe kao markeri i koje videoekstenzometar koristi kao referencu, istezala do te mjere da rub više nije bio ravan i oštar. Na temelju ovih zaključaka odlučeno je da se ispitivanja mogu provesti i bez mjerenja videoekstenzometrom i da to neće znatnije utjecati na točnost rezultata za modul elastičnosti.

4.6. Rad sa kidalicom

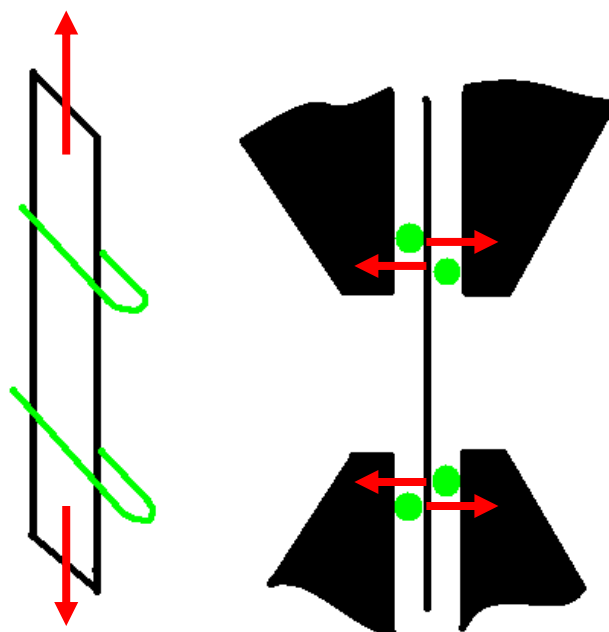
Ispitivanja su provedena na statičkoj kidalici Messphysik Beta 50-50 s maksimalnom silom opterećenja od 50 kN. Prije ispitivanja se u programu kidalice podese svi potrebni parametri poput brzine ispitivanja, dimenzije epruvete, vrsta ispitivanja itd. Izrezana epruveta se postavi u čeljusti kidalice te se pokreće program ispitivanja za svaku epruvetu prema unaprijed zadanim parametrima. Svaka guma je ispitana na tri temperature (-30°C , sobna temperatura, $+70^{\circ}\text{C}$) sa po pet epruveta.

4.7. Ispitivanja pri povišenoj i sniženoj temperaturi

Zbog velikog istezanja kod guma te velikih gabarita čeljusti nije bilo moguće koristiti komoru u kojoj je temperatura regulirana. Epruvete su tako bile postavljene u komoru i puštene da se zagriju na $+70^{\circ}\text{C}$ ili ohlade na -30°C minimalno dva sata, zatim su se epruvete vadile iz komore i postavljale u kidalicu koja se nalazila na sobnoj temperaturi. Time rezultati ispitivanja na povišenoj i sniženoj temperaturi ne odgovaraju u potpunosti rezultatima koji bi se dobili na -30°C i $+70^{\circ}\text{C}$. Budući da su sva ispitivanja provedena na isti način rezultati su međusobno usporedivi unatoč navedenom nedostatku u samom provođenju eksperimenta

4.8. Prihvat epruveta

Zbog nedostatka čeljusti za gumu, korištene su čeljusti za metal koje kod velikih sila ispitivanja imaju efekt uklinjanja te time epruvetu čvrsto drže. Gume se za razliku od metala jako sužuju i ne podnose velike sile, time je efekt samouklinjanja kliješta bio vrlo slab što je rezultiralo puzanjem epruveta kroz kliješta. Da bi se puzanje spriječilo prvotno je epruveta jače stegnuta, zatim dodatno zatezana tokom ispitivanja. To je uzrokovalo greške u dijagramima i dodatno smično opteretilo epruvetu. Problem je riješen korištenjem napravljene štipaljke koja se umetnula na „gripped length“, tj. duljinu prijhvata epruvete u čeljusti (slika 4.9.). Time je izazvan efekt omotavanja gume oko štipaljke što povećava silu kojom se epruveta drži. Puzanja više nije bilo, te se epruvete nisu morale jako stezati i nisu više bile smično opterećene. Važno je napomenuti da epruvete nisu pucale na mjestu gdje je postavljena štipaljka.



Slika 4.9. Epruveta uklinjena štikaljkama

Dodatan problem je bilo veliko izduženje epruveta bez pucanja što je posebno bilo izraženo pri sobnoj temperaturi i na $+70^{\circ}\text{C}$ pa je kidalica redovito dolazila do graničnika (slika 4.10.). Da bi se izazvalo pucanje epruveta smanjila se gripped length sa normom propisanih 110 mm na čak 45 mm.



Slika 4.10. Pre veliko istezanje epruveta pri sobnoj i povišenoj temperaturi

Epruvetama su se dodatno trebali odrezati krajevi kako bi stale u čeljusti kidalice (slika 4.11.).



Slika 4.11. Epruvete nakon ispitivanja

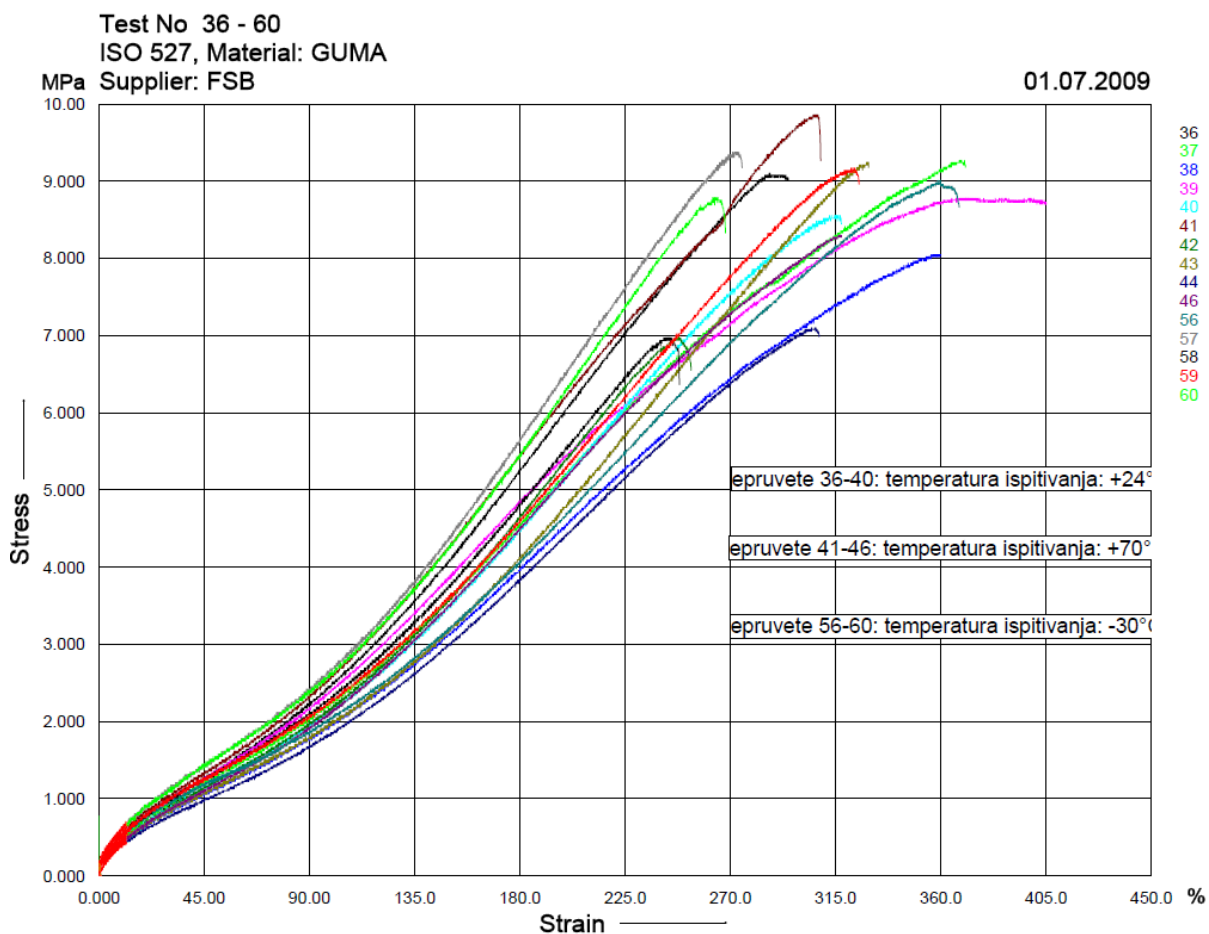
5. Rezultati ispitivanja

U ovom poglavlju su prikazani dijagrami svih ispitivanja kao i neki preklapljeni dijagrami za usporedbu rezultata. Uz to će za svako ispitivanje biti priložena tablica dobivenih traženih vrijednosti R_m , deformacije ε_m , istezljivosti A te iznos modula elastičnosti E . Legenda dobivenih vrijednosti u tablicama:

R_m	Vlačna čvrstoća
$A_g=\varepsilon_m$	Neproporcionalna postotna deformacija pri najvećoj sili
$A=\varepsilon_k$	Postotna deformacija nakon kidanja
E	Modul elastičnosti
F_m	Maksimalna sila
$A_t=\varepsilon_{kt}$	Ukupna postotna deformacija u trenutku kidanja
$A_{gt}=\varepsilon_{mt}$	Ukupna postotna deformacija pri najvećoj sili
S_0	Površina poprečnog presjeka epruvete

5.1. Guma 1

Rezultati ispitivanja na sve tri temperature za gumu 1 prikazani su dijagramom σ - ε na slici 5.1. i tablicama 5.1. do 5.3.



Slika 5.1. Guma 1 skupni dijagram

Tablica 5.1. Rezultati ispitivanja za gumu 1 pri sobnoj temperaturi

Test No	BNo	Rm MPa	Ag %	A %	E GPa	Fm N	At %	Agt %	S0 mm ²
36	E1_S_IP_stipaljka	9.105	9.669	20.18	3.28E-3	362.1	294.9	286.9	39.77
37	E2_S_IP_stipaljka	9.269	92.18	95.36	3.34E-3	354.3	370.6	370.1	38.22
38	E3_S_IP_stipaljka	8.049	85.47	85.61	2.93E-3	325.0	360.0	359.8	40.38
39	E4_S_IP_stipaljka	8.778	156.0	163.4	3.60E-3	390.2	405.0	399.7	44.45
40	E5_S_IP_stipaljka	8.557	65.30	69.11	3.40E-3	263.1	317.5	316.9	30.75
Mean:		8.752	81.72	86.73	0.000	338.9	349.6	346.7	38.71
Std.dev.:		0.481	52.68	51.70	0.000	48.34	43.71	44.70	5.012

Tablica 5.2. Rezultati ispitivanja za gumu 1 pri povišenoj temperaturi (+70°C)

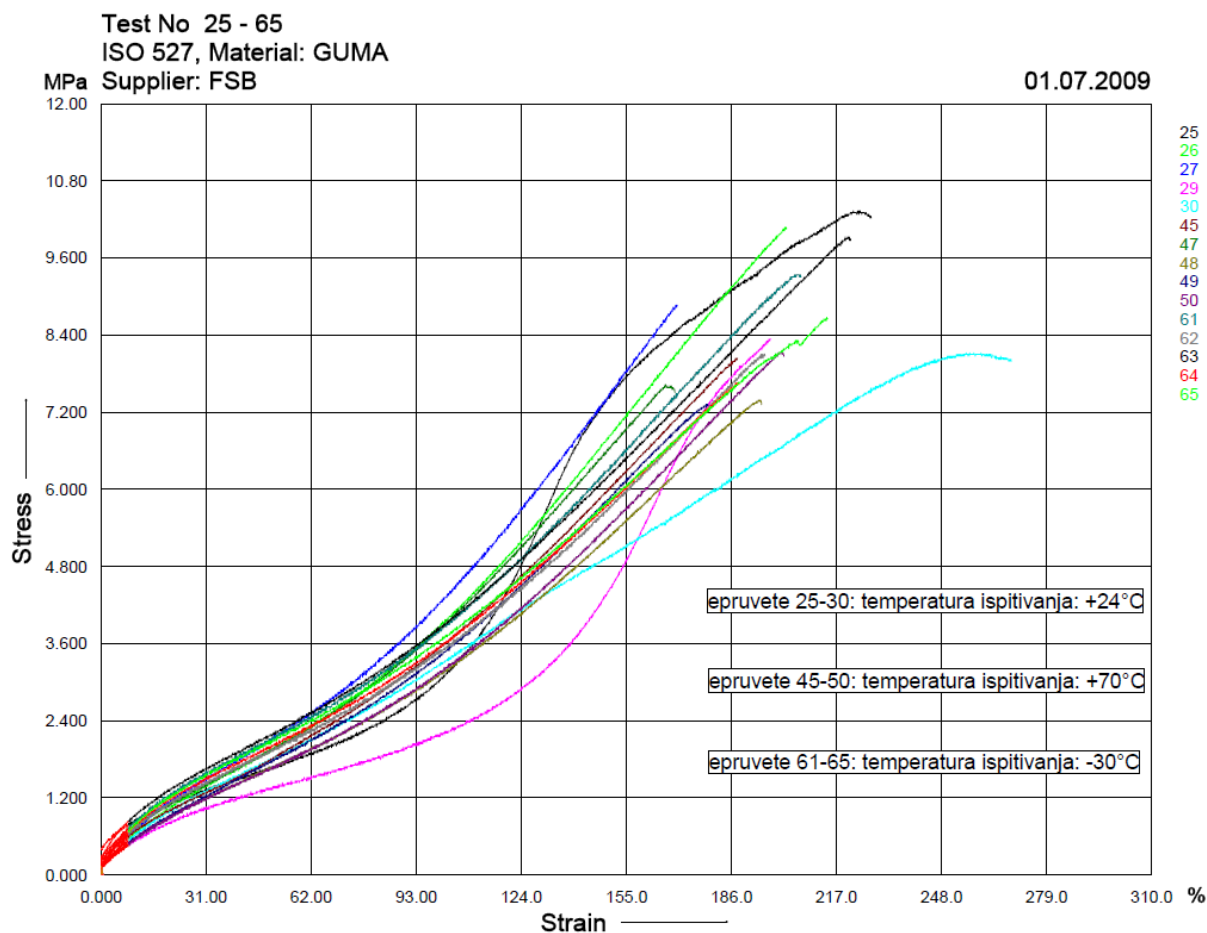
Test No	BNo	Rm MPa	Ag %	A %	E GPa	Fm N	At %	Agt %	S0 mm ²
41	E1_P_IP_stipaljka	9.858	14.21	33.08	3.36E-3	391.4	308.6	307.4	39.70
42	E2_P_IP_stipaljka	6.994	55.33	72.90	3.63E-3	283.4	253.2	247.9	40.52
43	E3_P_IP_stipaljka	9.246	-3.967	-3.967	2.78E-3	304.8	329.1	329.1	32.96
44	E4_P_IP_stipaljka	7.102	44.63	50.32	2.71E-3	339.6	307.9	306.5	47.82
46	E5_P_IP_stipaljka	8.298	57.08	57.84	3.19E-3	399.2	317.5	317.4	48.11
Mean:		8.300	33.46	42.03	0.000	343.7	303.3	301.7	41.82
Std.dev.:		1.271	27.08	29.44	0.000	51.29	29.27	31.41	6.329

Tablica 5.3. Rezultati ispitivanja za gumu 1 pri sniženoj temperaturi (-30°C)

Test No	BNo	Rm MPa	Ag %	A %	E GPa	Fm N	At %	Agt %	S0 mm ²
56	E1_SNIZ_IP	9.009	121.3	138.6	3.78E-3	409.4	367.8	359.7	45.44
57	E2_SNIZ_IP	9.375	56.17	62.29	4.31E-3	313.8	275.0	273.6	33.47
58	E3_SNIZ_IP	6.969	59.00	78.49	3.75E-3	232.8	248.2	244.8	33.40
59	E4_SNIZ_IP	9.173	81.74	88.37	3.80E-3	340.8	325.0	323.1	37.15
60	E5_SNIZ_IP	8.788	59.45	73.47	4.28E-3	300.3	267.9	264.7	34.17
Mean:		8.663	75.53	88.24	0.000	319.4	296.8	293.2	36.73
Std.dev.:		0.971	27.57	29.68	0.000	64.14	48.76	47.05	5.107

Guma IP se ponaša ujednačeno pri svim temperaturama. Pri sniženoj temperaturi pokazuje tendenciju povećanja modula elastičnosti. Pri ispitivanju ovih epruveta korištene su štipaljke radi sprečavanja puzanja.

5.2. Guma 2



Slika 5.2. Guma 2 skupni dijagram

Tablica 5.4. Rezultati ispitivanja za gumu 2 pri sobnoj temperaturi

Test No	BNo	Rm MPa	Ag %	A %	E GPa	Fm N	At %	Agt %	S0 mm ²
25	E1_S_Sved	10.33	-0.968	4.744	4.60E-3	434.1	227.2	223.9	42.02
26	E2_S_Sved	10.08	21.56	22.13	5.58E-3	419.5	202.3	202.2	41.62
27	E3_S_Sved	8.864	19.15	19.20	5.88E-3	298.0	170.0	170.0	33.62
29	E4_S_Sved	8.335	-0.267	-0.128	4.21E-3	339.6	197.6	197.5	40.75
30	E5_S_Sved	8.124	109.4	120.8	5.41E-3	350.9	268.6	259.6	43.19
Mean:		9.147	29.77	33.35	0.000	368.4	213.1	210.6	40.24
Std.dev.:		1.007	45.74	49.78	0.000	57.05	37.06	33.42	3.803

Tablica 5.5. Rezultati ispitivanja za gumu 2 pri povišenoj temperaturi (+70°C)

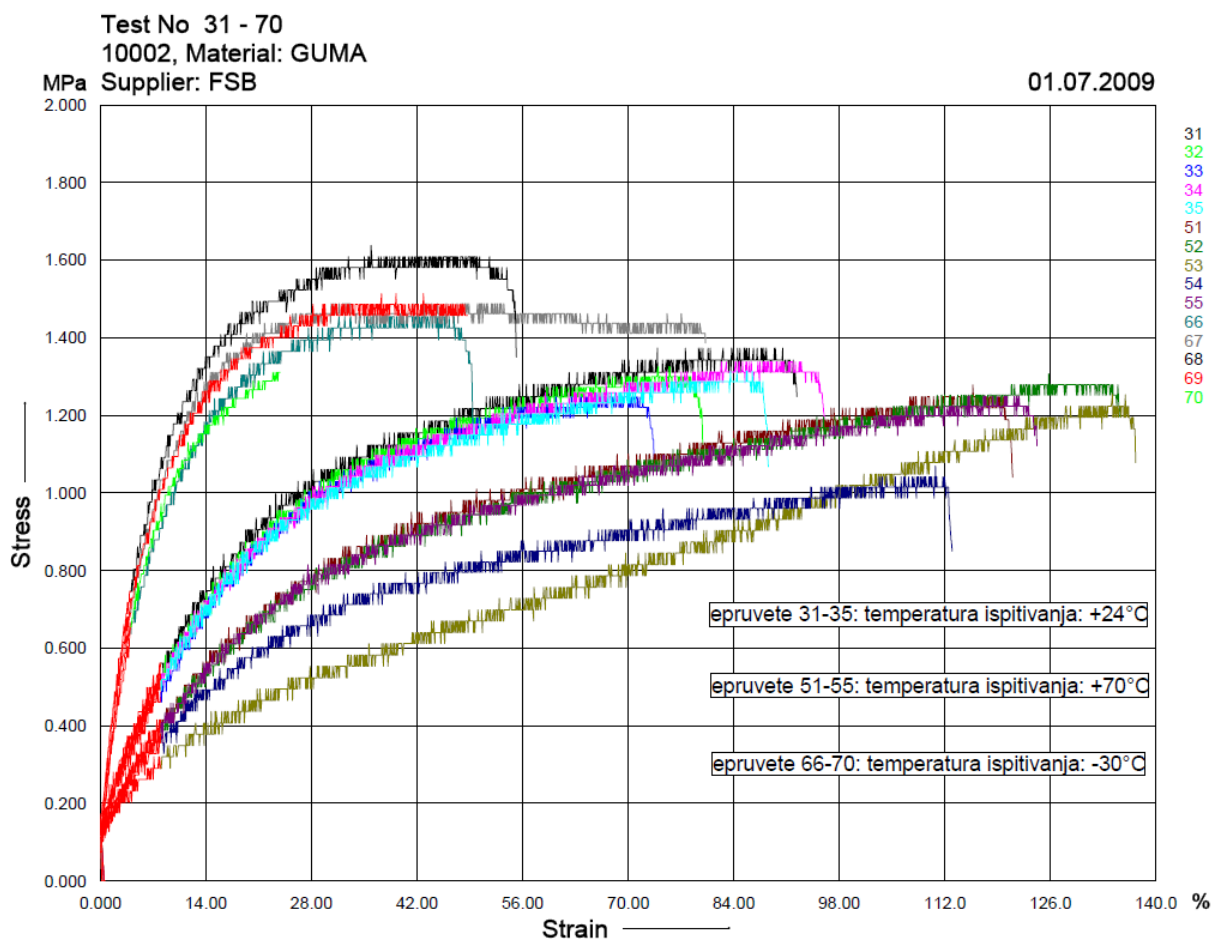
Test No	BNo	Rm MPa	Ag %	A %	E GPa	Fm N	At %	Agt %	S0 mm ²
45	E1_P_sved	8.036	20.78	20.88	4.81E-3	390.2	187.8	187.7	48.56
47	E2_P_sved	7.632	11.35	16.72	4.92E-3	332.9	169.3	166.5	43.61
48	E3_P_sved	7.390	38.04	39.78	4.72E-3	348.6	194.8	194.6	47.17
49	E4_P_sved	7.325	29.54	30.40	4.91E-3	316.0	179.2	178.8	43.14
50	E5_P_sved	8.151	21.84	24.41	4.56E-3	340.8	201.5	200.7	41.81
Mean:		7.707	24.31	26.44	0.000	345.7	186.5	185.7	44.86
Std.dev.:		0.373	10.03	8.988	0.000	27.65	12.70	13.46	2.866

Tablica 5.6. Rezultati ispitivanja za gumu 2 pri sniženoj temperaturi (-30°C)

Test No	BNo	Rm MPa	Ag %	A %	E GPa	Fm N	At %	Agt %	S0 mm ²
61	E1_SNIZ_sved	9.335	69.61	70.28	6.83E-3	312.6	206.5	206.4	33.49
62	E2_SNIZ_sved	8.104	67.15	67.78	6.30E-3	289.0	195.8	195.7	35.66
63	E3_SNIZ_sved	9.924	85.10	86.20	7.31E-3	428.5	221.2	220.8	43.17
64	E4_SNIZ_sved	7.658	75.81	76.52	6.83E-3	323.9	188.2	187.9	42.29
65	E5_SNIZ_sved	8.676	91.43	92.16	7.07E-3	379.0	214.5	214.1	43.68
Mean:		8.739	77.82	78.59	0.000	346.6	205.2	205.0	39.66
Std.dev.:		0.913	10.29	10.40	0.000	56.45	13.43	13.35	4.729

Guma ŠVED pokazuje tipična svojstva gume, pri povišenoj temperaturi modul elastičnosti i prekidna čvrstoća opadaj. Pri ispitivanju ovih epruveta korištene su štipaljke radi sprečavanja puzanja.

5.3. Guma 3



Slika 5.3. Guma 3 skupni dijagram

Tablica 5.7. Rezultati ispitivanja za gumu 3 pri sobnoj temperaturi

Test No	BNo	Rm MPa	Ag %	A %	E GPa	Fm N	At %	Agt %	S0 mm ²
32	E2_S_treca	1.325	48.60	57.37	4.93E-3	56.20	79.94	75.48	42.40
33	E3_S_treca	1.247	44.21	49.96	4.50E-3	51.70	73.46	71.91	41.45
34	E4_S_treca	1.338	64.94	71.98	4.78E-3	56.20	96.07	92.94	42.01
35	E5_S_treca	1.313	59.25	66.48	4.83E-3	53.95	88.58	86.45	41.07
Mean:		1.306	54.25	61.45	0.000	54.51	84.51	81.69	41.73
Std.dev.:		0.040	9.522	9.744	0.000	2.154	9.886	9.720	0.589

Tablica 5.8. Rezultati ispitivanja za gumu 3 pri povišenoj temperaturi (+70°C)

Test No	BNo	Rm MPa	Ag %	A %	E GPa	Fm N	At %	Agt %	S0 mm ²
51	E1_P_treca	1.278	80.73	92.53	3.66E-3	48.35	121.0	115.7	37.82
52	E2_P_treca	1.307	87.62	99.59	3.43E-3	52.85	135.3	125.8	40.43
53	E3_P_treca	1.253	76.33	86.00	2.10E-3	48.35	137.3	135.9	38.58
54	E4_P_treca	1.070	74.37	84.05	2.94E-3	43.85	113.0	110.8	41.00
55	E5_P_treca	1.249	84.94	91.12	3.39E-3	55.10	124.2	121.8	44.10
Mean:		1.231	80.80	90.66	0.000	49.70	126.2	122.0	40.39
Std.dev.:		0.093	5.590	6.100	0.000	4.386	10.14	9.654	2.450

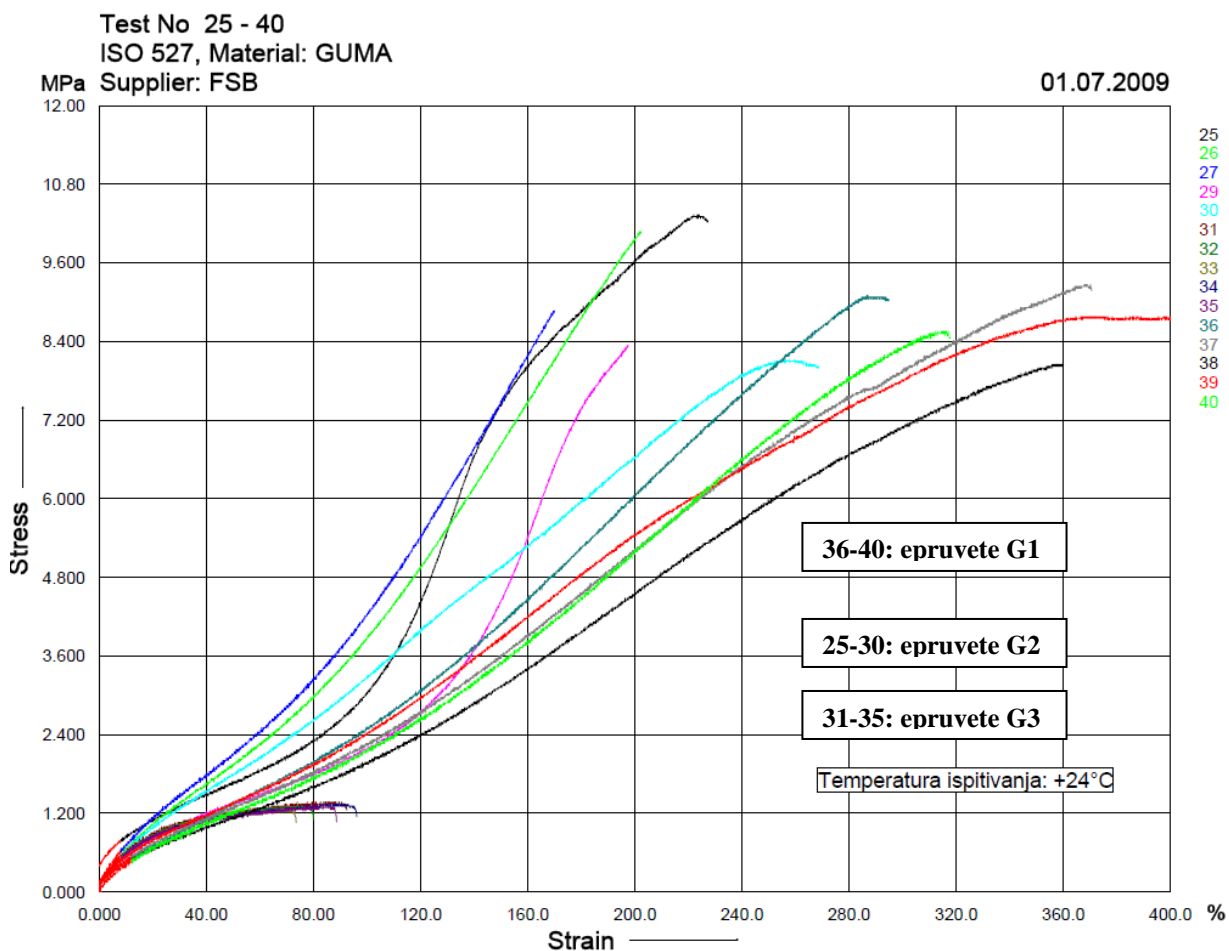
Tablica 5.9. Rezultati ispitivanja za gumu 3 pri sniženoj temperaturi (-30°C)

Test No	BNo	Rm MPa	Ag %	A %	E GPa	Fm N	At %	Agt %	S0 mm ²
66	E1_SNIZ_treca	1.455	36.23	40.67	0.014	53.95	49.35	46.91	37.08
67	E2_SNIZ_treca	1.488	44.10	71.48	0.016	66.35	80.24	53.49	44.60
68	E3_SNIZ_treca	1.638	25.26	46.44	0.015	64.10	55.20	35.88	39.13
69	E4_SNIZ_treca	1.514	32.45	38.70	0.015	60.70	48.68	42.81	40.10
70	E5_SNIZ_treca	1.311	14.20	14.25	0.014	65.20	23.81	23.77	49.74
Mean:		1.481	30.45	42.31	0.000	62.06	51.46	40.57	42.13
Std.dev.:		0.118	11.34	20.44	0.000	5.001	20.12	11.36	5.065

Kod gume 3 izražena je promjena istezanja koja opet pokazuje tipična svojstva gume, pri povišenoj temperaturi izduženje je veće, pri sniženoj je manje. Modul elastičnosti raste sa opadanjem temperature dok je pri sniženoj temperaturi guma očvrstnula i prekidna čvrstoća je porasla. Mjerenja provedena sa ovom gumom su bila najjednostavnija i najlakša jer se radi o relativno krutoj (najveći modul elastičnosti od svih ispitanih guma) i slaboj (R_m ne veći od 1.6 MPa) gumi. Tijekom stezanja epruveta u čeljustima nije bilo potrebno koristiti štipaljke.

Guste vertikalne crte su posljedica nepreciznog mjerenja malih sila.

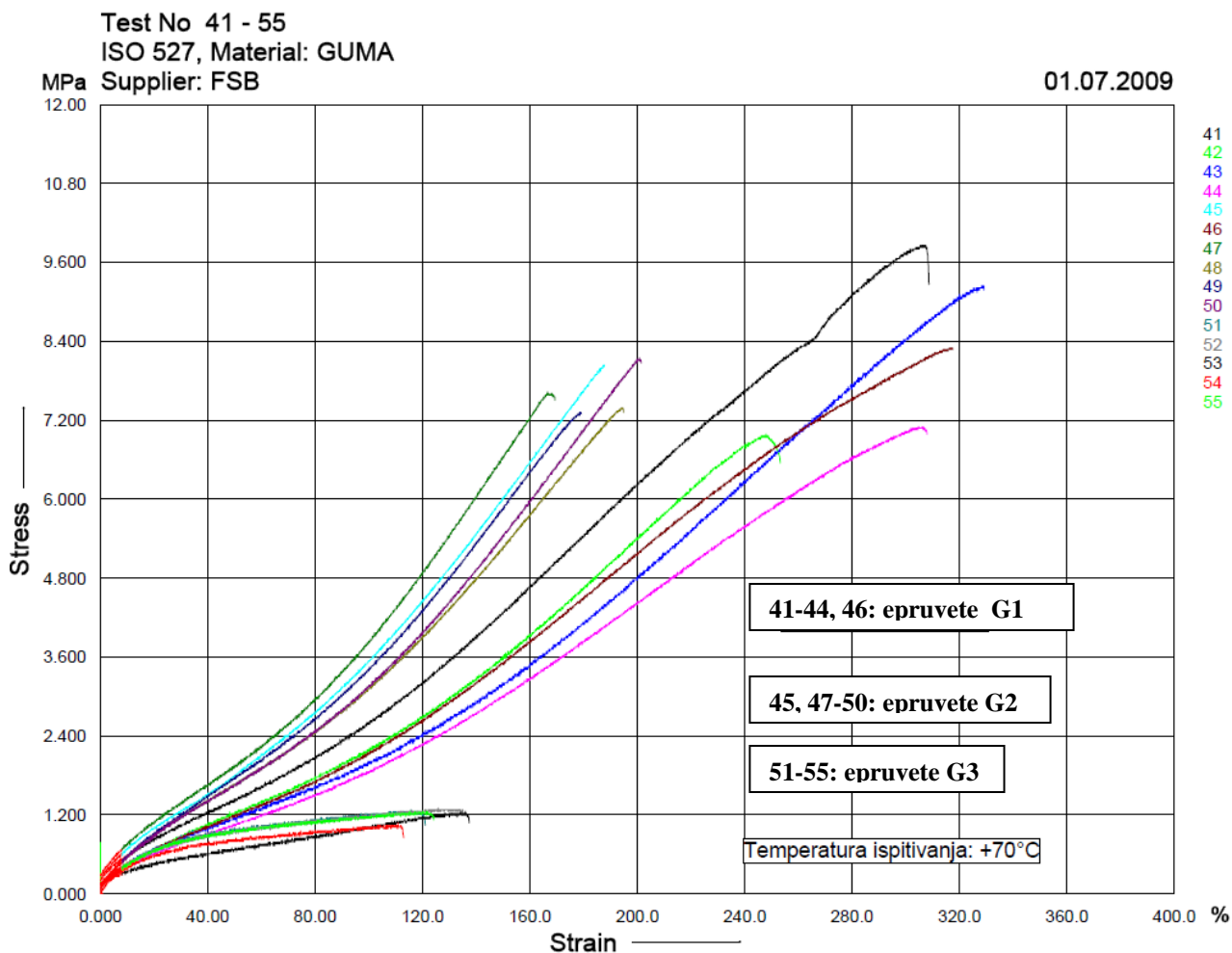
5.4. Skupni dijagram rezultata pri sobnoj temperaturi



Slika 5.4. Skupni dijagram rezultata pri sobnoj temperaturi

Guma 2 ima najveću prekidnu čvrstoću dok guma 1 ima najveće izduženje. Svojstva G1 i G2 su ujednačena. Guma G3 je najslabija.

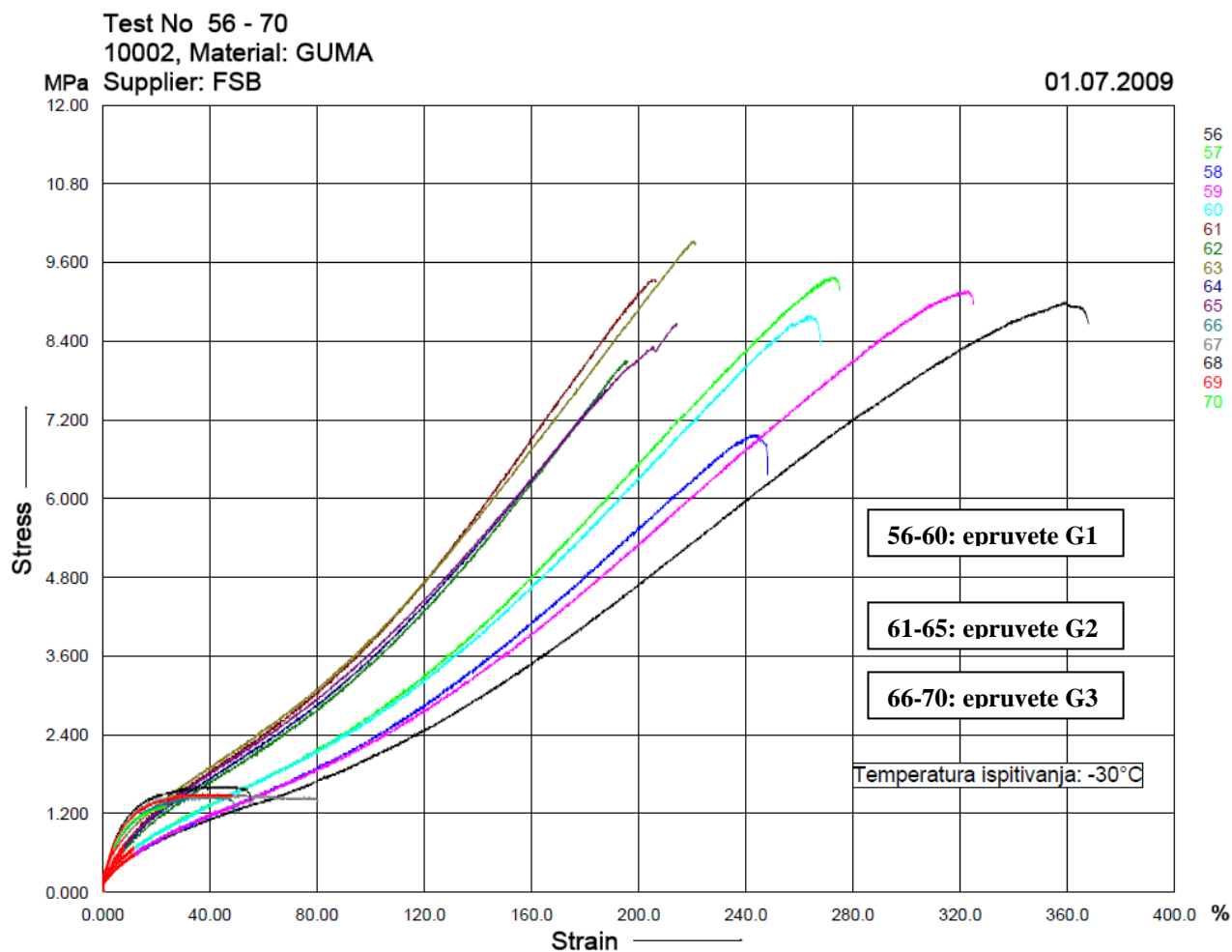
5.5. Skupni dijagram rezultata pri povišenoj temperaturi (+70°C)



Slika 5.5. Skupni dijagram rezultata pri povišenoj temperaturi (+70°C)

Pri povišenoj temperaturi guma 1 najviše zadržava svoja svojstva kao na sobnoj temperaturi dok svojstva gume 2 opadaju, ponajviše prekidna čvrstoća. Guma 3 se više izdužuje.

5.6. Skupni dijagram rezultata pri sniženoj temperaturi (-30°C)



Slika 5.6. Skupni dijagram rezultata pri sniženoj temperaturi (-30°C)

Guma 1 i guma 2 zadržavaju svoja svojstva kao na sobnoj temperaturi dok guma 3 pokazuje značajan rast modula elastičnosti na uštrb izduženja.

6. Zaključak

Cilj ovog rada je bio eksperimentalno odrediti mehanička svojstva tri vrste guma na temperaturama -30°C , $+23^{\circ}\text{C}$ i $+70^{\circ}\text{C}$. Ispitivanjima su određena sljedeća svojstva materijala: modul elastičnosti E , vlačna čvrstoća R_m i pripadna deformacija ε_m , te istezljivost A .

Da bi se modul elastičnosti i istezanje odredili što točnije bilo je predviđeno da se mjerenja tijekom opterećivanja epruveta provedu bezkontaktno pomoću videoekstenzometra. Međutim, usporedna mjerenja na uzorcima pri sobnoj temperaturi sa i bez videoekstenzometra pokazala su da su pri tako malim silama kidanja (do 450 N) deformacije kidalice zanemarivo male i da ne utječu na rezultate za modul elastičnosti E i istezljivost ε , a osim toga, problemi sa opadanjem markera i izduženjem boje objašnjenim u poglavlju 4.4. odlučeno je da se sva mjerenja na sve tri temperature provedu bez videoekstenzometra.

Rezultati pokazuju da guma 3 ima najlošija svojstva, odnosno najniže vrijednosti za E , R_m i ε . Gume 1 i 2 imaju približno istu vlačnu čvrstoću na sve tri temperature, dok je modul elastičnosti nešto niži za gumu 1 ali je istezljivost veća od istezljivosti gume 2.

Iz dijagrama za gumu 1 je vidljivo da temperatura neznatno utječe na R_m . Vlačna čvrstoća je najmanja na povišenoj temperaturi, dok na sobnoj i nižoj temperaturi nema znatnije razliku u vrijednostima R_m . Modul elastičnosti je najveći na -30°C i neznatno pada s porastom temperature. Istezljivost je najizraženija pri sobnoj temperaturi a pri -30°C i $+70^{\circ}\text{C}$ vrijednosti su gotovo identične.

Kod gume 2 pri sobnoj i sniženoj temperaturi vlačna čvrstoća se neznatno razlikuje, dok pri povišenoj temperaturi ima nešto nižu vrijednost. Modul elastičnosti s porastom temperature znatno opada. Istezljivost je najmanja pri povišenoj temperaturi a pri temperaturama -30°C , $+23^{\circ}\text{C}$ razlika je vrlo mala.

Vlačna čvrstoća gume 3 opada s porastom temperature. Vrijednost za R_m na $+70^{\circ}\text{C}$ iznosi 83% vrijednosti pri -30°C . Ova pojava je još izraženija kod modula elastičnosti koji pri povišenoj temperaturi iznosi 21% vrijednosti pri -30°C . Istezljivost znatno raste s porastom temperature i tri puta je veća na povišenoj nego na sniženoj temperaturi.

Nešto veće rasipanje rezultata koji je kod sve tri gume i to na sve tri temperature najizraženiji za istezanje može se objasniti neujednačenošću dimenzija epruveta, a što se prvenstveno odnosi na debljinu. Naime, zbog velike elastičnosti materijala pločice se nisu mogle izrezati jednakih debljina. Ta neujednačenost u debljini nije uočena samo između epruveta, već je znatnije odstupanje bilo prisutno i između krajeva kod pojedinih epruveta.

U kojoj je mjeri struna nađena u gumi 1 utjecala na oštećenja gumenih cijevi u eksploataciji ne može se utvrditi na temelju dobivenih rezultata za mehanička svojstva. Za pouzdano određivanje tog utjecaja potrebno je provesti dodatna ispitivanja na uzorcima sa i bez strune.

7. Popis literature

- [1] Norma ISO 527
- [2] Gume: <http://www.infoplease.com/ce6/sci/A0860821.html>
<http://hr.wikipedia.org/wiki/Polimer>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Elastomer>
<http://pslc.ws/mactest/elas.htm>
<http://www.infoplease.com/ce6/sci/A0860823.html>
- [3] T.Filetin, Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [4] I.Alfirević, Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga, Zagreb, 1995.
- [5] Videoextensometer Messphysik ME46-NG user manual